

文章编号: 1672-8785(2008)12-0009-06

四波混频原理及其应用

郑 涛^{1,2} 贺海霞^{3,4} 张 琛¹

(1. 西北大学光子所, 陕西 西安 710069 ;

2. 陕西青年职业学院, 陕西 西安 710068 ;

3. 西北大学生命科学学院, 陕西 西安 710069 ;

4. 陕西省自然保护区和野生动物管理站, 陕西 西安 710082)

摘 要: 本文给出了四波混频的原理及特点, 理论上推导了四波混频的产生, 并给出了四波混频在光纤通信的密集波分复用、相位共轭波产生、四波混频实时光学检测中的应用。本文的研究目的旨在较为全面地掌握四波混频这一典型的非线性光学效应的应用方向, 通过总结四波混频在已经较为成熟的研究领域的具体应用及研究方法, 借此寻找四波混频更广泛的应用领域。

关键词: 相位共轭波; 非线性介质; 四波混频; 光电子

中图分类号: O43 **文献标识码:** A

Four-wave Mixing Theory and Its Applications

ZHANG Tao^{1,2}, HE Hai-xia^{3,4}, ZHANG Chen¹

(1. Institute of Photonics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Shaanxi Youth Vocational College, Xi'an 710068, China;

3. College of Life Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, China;

4. Shaanxi Natural Reserve and Wild Animal Management Station, Xi'an 710082, China)

Abstract: In this paper, the principle and features of four-wave mixing are given. The generation of four-wave mixing is derived in theory and the applications of four-wave mixing in the DWDM for optical fiber communication, phase conjugation wave generation and real time optical detection are given. The study in this paper is aimed at more completely knowing the application direction of the four-wave mixing, a typical nonlinear optical effect and finding more applications for the four-wave mixing by summing up the existing relatively mature applications and research methods.

Key words: phase conjugation wave; nonlinear medium; four-wave mixing; photonics

1 引言

在非线性介质中的四波混频是目前普遍采用的一种重要的实现光学相位共轭的方法。早在 20 世纪 60 年代, 全息术的开拓者们如 Gabor、Denisyuk、Leith 和 Upatnieks 等就产生了光波混频的想法。自 Kogelnik 于 1965 年提出传统的静态全息技术可通过静态不均匀介质成像之后,

全息技术的发展就与最早的光学相位共轭有关了^[1]。1971 年, Stepanov 等人分别提出了实时全息的设想并做了验证。他们的想法是基于两束相干光在特定的非线性材料中形成全息图, 同时由第三束光(波长可与前两束光不同)读出记录的信息, 这就是四波混频的雏形。而四波混频真正作为产生相位共轭波的方法是在 1977 年

收稿日期: 2008-08-22

作者简介: 郑涛(1979—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为非线性光学应用。

由美国南加州大学的 Hellwarth 提出的, 他成功地用非线性光学描述了这种现象。在这之后, Yariv、Pepper、Bloom、Bjork-lunk 和 Liao 等人也进行了有关研究, 并进一步发展了这一理论, 同时, 其他许多科学家也对四波混频相位共轭的理论和技术做出了重要贡献。他们以不同的理论模式对四波混频相位共轭的许多方面及有关现象作了大量的理论分析和实验工作, 如双光子相位共轭理论、精确简并四波混频理论、共振吸收增强的四波混频理论、简并前行四波混频相位共轭、自泵浦四波混频相位共轭起因以及自脉动和光学混沌、非线性偏振光束的时间反演、连续波增益的相位共轭反射镜、人造非线性介质中的四波混频、各向异性介质表面反射部分的相位共轭、瞬态非相干光的四波混频超高频干涉等等^[1]。与全息术相类似, 四波混频方法中涉及四个光波在非线性介质中的相互作用, 三束输入光波中的两束是相对传播的泵浦光波, 另一束为入射探测光波。通过光束与非线性介质的耦合作用产生第四束光波即入射探测光波的共轭光波。这种耦合作用相当于探测光波(即物光波)与一束泵浦光波(即参考光波)形成光强的周期条纹分布。这种干涉引起介质中的微扰作用, 使介质的物理性质(如折射率分布)也产生相应的周期变化, 其作用等于形成一个动态体积全息图。当另一束反向传播的泵浦光波照明介质时, 受该全息图衍射或反射, 其衍射光波与入射探测光波在同一直线上, 传播方向相反, 这就是要产生的相位共轭光波。类似的全息图有两个, 是由探测光波分别与两束泵浦光波干涉形成的, 可以分别看作是反射全息图和透射全息图。即四波混频相当于使全息术中的记录、显影、读出过程同时发生, 在照明光波被去掉后, 介质中的折射率变化就消失了(有些介质消失得较慢, 需一定的时间), 并且全息图随物光波的变化而变化。四波混频与光折变材料四波混频的原理被提出以后, 大量的工作集中在用于四波混频的非线性材料上, 特别是对弱光响应的材料。光折变材料是目前进行四波混频相位共轭的最有效的材料。这些材料具有非线

性系数大、耦合效率高、高灵敏度以及低功率效应等优点。早在 1966 年, 贝尔实验室的 A.Ashkin 等人就发现了 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体具有“光损伤”效应, 即晶体在强激光照明下会引起照明点处的折射率发生变化, 当去掉照射光束时晶体经一定时间会恢复到原来的无损伤状态, 而加温或用均匀光照射晶体, 会加快恢复过程、消除“光损伤”, 这种效应又被称为光折变效应(Photorefractive effect)^[2]。其后光折变材料被广泛应用于全息存储、四波混频光学相位共轭、光学信息处理、光计算、非相干/相干光转换等诸多方面。至今, 近半数发表的相位共轭方面的学术论文都是以光折变材料作为混频介质的。目前已发现的光折变材料有许多种, 但在相位共轭方面经常应用的还不多, 主要包括 BaTiO_3 、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO)、 LiTaO_3 : Fe、 $\text{Sr}_{1-x}\text{BaNb}_2\text{O}_6$ (SBN)、 LiTaO_3 、 KNbO_3 、 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_2\text{O}_{15}$ 、 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) 等。在四波混频中利用的是它们的光折变(光感应折变率变化)性质。在这些材料中, BaTiO_3 和 KNbO_3 等晶体具有很大的光电系数, 并可用于自泵浦相位共轭, 是比较好的混频材料。其缺点是响应时间慢, 价格昂贵, 难以得到高质量大体积的晶体。我国中科院物理所等单位曾试生产这些晶体, 但是目前成品有限, 还难以满足各方面的需要。尽管光折变材料本身的固有特性使得它在简并四波混频相位共轭技术方面成为一种很有前途的材料, 但是对于目前已有的绝大多数这类材料来说, 其光响应的灵敏度、响应速度以及其他特性不可兼得。因此, 影响四波混频在实际应用中进一步发展的主要障碍仍然是缺乏理想的可利用的混频非线性材料。而在材料没有获得突破性发展的情况下, 现有材料在各方面的应用也就变得非常重要。

2 四波混频对通信系统的影响及抑制方法

以光的波分复用(WDM)技术为基础的光通信可以有效地扩大通信容量。随着无中继传输距离的增加, 需要加大发射功率。但是在大的光功率激励下, 光纤会呈现不良的非线性现象。光纤中的非线性效应一般可分为受激散射效应

和非线性折射率变化。前者包括受激喇曼散射 (SRS) 和受激布里渊散射 (SBS) 等; 后者包括四波混频 (FWM) 效应、自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 等。在 WDM 系统中, 各种光纤非线性的影响不一定相同, 最有危害性的是由 FWM 引起的密集波分复用 (DWDM) 系统的路间串扰。通常对多级放大系统光纤的 FWM 特性进行的研究往往假设每两级放大器间只有一种长度相等的光纤, 这与实际情况不符。事实上, 两个放大器间的传输介质可以由几段不同长度、不同色散值的光纤组成。在高弛渡电磁场中, 光纤对光的响应会变成非线性, 光纤中的非线性现象主要有自相位调制、交叉相位调制、四波混频、受激拉曼散射和受激布里渊散射。光纤中的非线性效应的最初实验是在多模光纤中进行的, 随着低损耗单模光纤的发展, 单模光纤非线性效应已经成为众多研究工作的重点。单模光纤芯径小, 光信号长距离传输, 可使产生光学非线性现象所需的功率阈值比块状介质降低几个数量级。通常, 在几个毫瓦的光功率下就可观察到一些非线性效应。在现代光通信系统中, 光纤放大器作为功率放大器, 使光纤中传播的光功率密度大大增加, 又由于人们一味地希望减小光纤的损耗和色散, 这些无疑为光纤中非线性现象的发生提供了有利条件。非线性现象严重影响通信系统的性能, 特别是四波混频效应是一种影响较大的非线性效应。

众所周知, 在无须重新铺设传输线路的情况下, 采用波分复用是扩大光纤通信系统容量的一种行之有效的力法。在系统中, 掺铒光纤放大器作为功率、中继和前置放大器为波分复用的长距离传输提供了有利条件。在已铺设的很多采用标准单模光纤的传输线路中, 随着大容量、高速率系统的使用, 光纤的色散问题变得非常严重。因此, 又研制出光纤, 即色散位移光纤。虽然这种光纤具有零色散和较小的传输损耗, 在单波长、长距离通信中具有较大的优越性, 以至于人们认为是最理想的光纤, 但在 WDM 系统中, 在 DSF 传输线路中采用掺铒光纤放大器作为功率放大器, 使光纤中的光功率密度大大增

加, 为非线性效应的发生提供了有利条件。由于光纤的色散很小, 四波混频的相位匹配条件很容易满足。四波混频的发生不仅导致信号光功率的下降, 而且产生的新频率光波可能落在信号光的频带内引起信道间的串扰, 并最终导致误码的发生。虽然玻璃中的三阶非线性极化率非常弱, 但对于强光场, 光纤芯中的四波混频光可以非常强, 因此, 人们已研究出多种抑制的技术方案。

目前已经大量敷设的常规单模光纤 (G.652 光纤) 在 $1.5\mu\text{m}$ 的工作波长处有最小的传输损耗, 且其带宽非常宽 (10THz), 实际上应用得较多的 STM-19 系统 (2.5Gb/s) 也只利用了光纤巨大带宽的一小部分。由于新建光纤线路的投资较大, 如何在已经敷设并投入使用的光纤线路上进行升级扩容, 成为一个重要的研究课题。密集波分复用技术是目前比较适合方案, 其最大的优点是不需要对原有的光纤线路进行大的改造, 便可极大地增加系统的传输容量^[3]。DWDM 器件的插入损耗以及光纤线路的损耗问题, 可以通过引入目前已经实用化的掺铒光纤放大器来加以解决, 进而延长中继距离。但是 EDFA 较高的输出功率会在光纤中引起非线性效应, 例如自相位调制、交叉相位调制、受激喇曼散射、受激布里渊散射和四波混频等, 其中 FWM 对 DWDM 系统的影响较大, 在某些特殊情况下甚至会导致系统传输质量的严重劣化, 因此必须加以分析和研究。

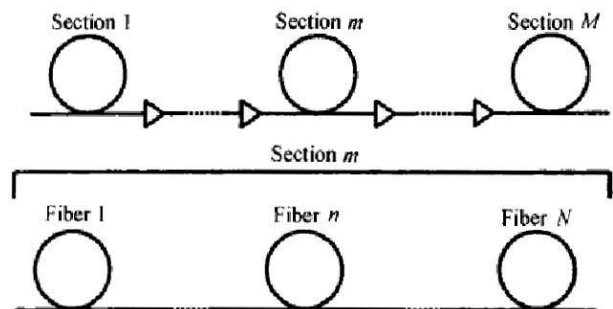


图 1 多级放大不同色散光纤组成的 WDM 系统

2.1 利用 NZ-DSF 抑制 FWM

为有效遏止 FWM, 容许在光纤中传播较大功率和多路波长信号, 非零色散位移光纤 NZ-DSF 应运而生, 其特点是对零色散波长点进行

了移动, 零色散点设置在 1520nm 或 1570nm 波长处, 而在 1548nm ~ 1565nm 范围内, 色散值保持在 1.0 ~ 4.0ps/nm.km 的水平上。工作波长避开了零色散区, 但又保持了较小的色散, 使相位匹配条件不易满足。NZ-DSF 和 DSF 相比, 只是零色散波长的移动。虽然色散系数不为零, 但与常规光纤相比已大大降低, 缓解了色散受限距离。NZ-DSF 的突出优点是兼容了常规光纤小口的优点, 又解决了常规光纤的色散受限和 NZ-DSF 难以实现 DSF 的致命弱点。NZ-DSF 的使用使在低色散和低损耗波段区开通足够多波长的 DWDM 系统而又不受四波混频的影响成为可能。

2.2 改变信道间距

在已铺设的 DSF 线路上开通 DWDM 系统, 利用适当不等间距的波长信道配置设计来实现, 通常选择通道频率, 使产生的新频率分量大部分落在通道滤波器通带之外, 这种技术用于 10 个信道, 每个信道速率为 10Gb/s 以下的系统可大大减小四波混频的影响; 加大信道间距也可抑制四波混频的效率, 这却是以牺牲系统带宽为代价的^[4]。实际上, 采用部分等间距信道更为有意义, 其核心在于使通道间隔相对远的信道之间的四波混频所产生的频率分量落在信道滤波器通带内, 由于四波混频的效率随着波长间隔加大而降低, 引入的恶化并不严重, 这样可使系统容纳更多的波长。

2.3 工作波长的改变

在 DSF 线路上, 通信系统的工作波长为 1550nm, 也即光纤的零色散波长。Masahiko Jimino 等人提出采用所谓增益位移掺铒光纤放大器 GS-EDFA, 将这种新型的 GS-EDFA 用于前置、功率和线路放大, 传输光信号波长采用 1580nm 波段而不是常用的 1550nm 波段, 这样就可以在已铺设的大量的 DSF 线路上采用波分复用系统。Lucent 公司进行了试验, 工作波段为 1574nm ~ 1590nm, 在此波长范围内的色散 $D=2 \sim 5\text{ps/km.nm}$ 。传输容量为 200Gb/s, 全长 320km, 中继跨距为 80km, 采用了 EDFA 放大和少量补偿光纤。

2.4 通过色散管理抑制 FWM

对于长距离、多级 EDFA 放大的 DWDM 系统, 若采用标准单模光纤作为传输光纤, 用高负色散光纤作色散补偿, 由于高的局部色散, FWM 的产生受到有效抑制, 这样的色散管理系统, 在可接受的信噪比及其变化量的情况下, 20 个 FWM 信道的系统可传输 4000km。抑制等信道间距干线光纤通信系统中光纤色散和四波混频效应, 可采用一个同时有效减弱等信道间距系统中光纤色散和四波混频效应的新型色散补偿方案。此方案具有宽带、低损耗、简单可靠等优点。

2.5 其他抑制四波混频的方法

四波混频的效率极大地依赖于相位匹配条件, 它与光纤中的每个光信号的色散密切相关。Nakajima K 等人已研制出色散分配光纤 DDF, 这种光纤沿长度方向具有不等的色散, 对每个信号波有不同的色散, 破坏了几个光波的相位匹配, 也就抑制了四波混频效应。把双折射元件用于传输线路中, 由于双折射元件对光的偏振态的作用, 由四波混频产生的串扰可降低。在多级光放大的 WDM 系统的传输线路中加入延迟线, 延迟线和波分复用/解复用器的共同使用破坏了四波混频的相位匹配条件, 从而有效地抑制了四波混频效应。

3 四波混频在光学干涉计量和信息处理中的应用

HellWarth 提出四波混频产生相位共轭波。除此之外, 光子回波、等离子体效应、非局域效应、非线性材料表面反射等非线性光学过程也可用于产生相位共轭波光学相位共轭。

光学相位共轭的研究在我国起步较晚, 但是因为它有许多令人惊奇的应用前景, 在国内越来越多地受到人们的关注。它已经可望在光纤图像传输、相干图像放大、光学滤波、畸变补偿、自适应光学的导向与跟踪、图像处理、相关识别、相关存贮、新型光学振荡器的设计、高分辨率成像、光计算、多稳态、消多普勒效应、偏

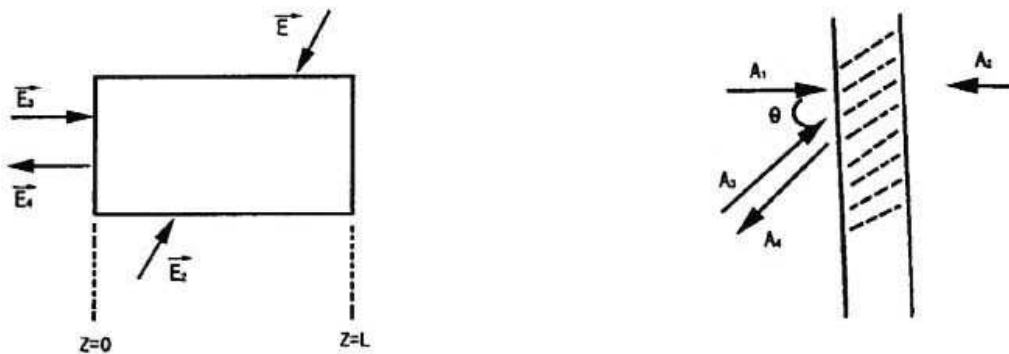


图 2 四波混频产生相位共轭波

振态恢复、光学开关、多通道共轭、多色共轭、饱和光谱学、干涉计量等许多方面得到应用^[5]。另外,光学相位共轭的概念、技术和基本用途原则上也可用于电磁波谱的其它大多数领域以及声子声波等领域中,所有这些应用都将对有关领域的发展产生巨大的影响。正如苏联物理学家指出的那样,“光学相位共轭技术的应用范围似乎只受人们想象力的限制”。而利用四波混频的相位共轭技术更是广泛应用于光学干涉计量和信息处理领域中^[6]。在干涉计量方面,四波混频相位共轭波被用于迈克尔逊干涉仪、马赫-陈德尔干涉仪晶体内多光栅反射光波干涉、四波混频无损干涉检测等方法中,而以往的四波混频在空间信息处理中的应用主要类似于全息术中的图像加、减、乘、除、微分、积分、空间卷积和空间相关、强度滤波、边缘增强、动态追迹、二进制信息逻辑运算和数据处理、相干放大以及迭代光学处理器等等^[7]。

4 四波混频实时光学检测的应用

传统的全息干涉测量术是光学检测中经常采用的测量方法,其中两次曝光全息干涉虽然具有消除系统误差等特点,但每测量一块样品就要拍摄一张全息图,还要经过复杂的处理过程;而一次曝光实时测量法虽然可重复测量,但是需要拍摄一张标准波面的全息图,该全息图在处理时要防止记录材料变形(如乳胶收缩等)并要精确复位,而且条纹对比度也较差^[8]。文献中提出了利用光折变晶体的简并四波混频的实时两次曝光无损检验法,它不需要处理全息

图,晶体可反复使用,但是这种方法不能测量同时具有折射率和面形分布不均匀性的光学零件(如平板玻璃)或其它相位目标物。简并四波混频相位共轭近年得到了快速的发展^[9]。

本文提出了一种新的测量和计算方法,利用光折变晶体介质作动态四波混频,利用共轭光波进行实时两次曝光无损检测,它不仅具有一般实时全息干涉计量的特点,并且利用 Meyer 提出的方法,即借助于样品表面的反射光形成的干涉条纹同时测量光学平板玻璃等透明物体的折射率分布不均匀性及面形不均匀性^[10];本文对实时两次曝光法中的曝光时间与条纹对比度等各参量的关系作了讨论;并以玻璃平板为样品进行了实际测量。

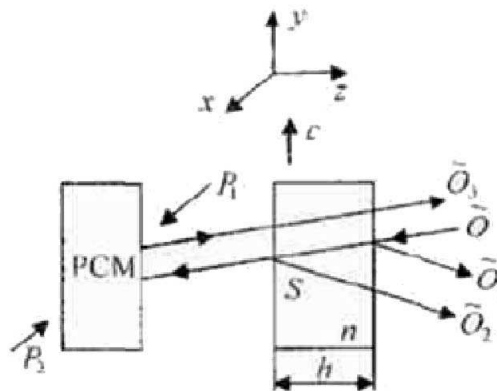


图 3 测量原理示意图

5 结论

本文给出了四波混频的原理及特点,理论上推导了四波混频的产生,并给出了四波混频在光纤通信的密集波分复用、相位共轭波产生、四波混频实时光学检测中的应用。

参考文献

- [1] 石顺祥. 非线性光学 [M]. 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [2] 钱士雄. 非线性光学原理及进展 [M]. 复旦大学出版社, 2001.
- [3] 沈元壤, 顾世杰. 非线性光学原理 (上册) [M]. 科学出版社, 1987.
- [4] 费浩生. 非线性光学 [M]. 高等教育出版社, 1990.
- [5] Ron Briggs, Julia Schafer, Wendy Lyons, et al. Sub-Doppler high-resolution wave-mixing detection method for isotopes in environmental applications [C]. SPIE, 2004, 5586: 54-59.
- [6] Michael J Maniaci, William G Tong. Multiphoton laser wave-mixing absorption spectroscopy for samarium using a graphite furnace atomizer [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2004, 59: 967-973.
- [7] David W Neyer, Larry A Rahn, David W Chandler, et al. Circular Dichroism Spectroscopy Using Coherent Laser-Induced Thermal Gratings [J]. American Chemical Society, 1997, 119: 8293-8300.
- [8] James E Knittle, Adrian A Atherton, William G Tong. Sensitive detection of enzyme activity by multi-photon nonlinear laser spectroscopy [C]. SPIE, 2004, 5587: 177-182.
- [9] Fritz Mickadeit, Helen Kemp, Julia Schafer, et al. Sensitive Sub-Doppler Nonlinear Spectroscopy for Hyperme structure Analysis Using Simple Atomizers [C]. SPIE, 1998, 3270: 168-173.
- [10] Wendy Lyons, Julia Schafer, Ron Briggs, et al. Nonlinear wave-mixing spectroscopy for sub-Doppler isotope analysis with trace-level detection sensitivity [C]. SPIE, 2005, 5971(09): 1-6.

国外专利介绍

定向红外对抗系统与方法

美国专利 US7378626

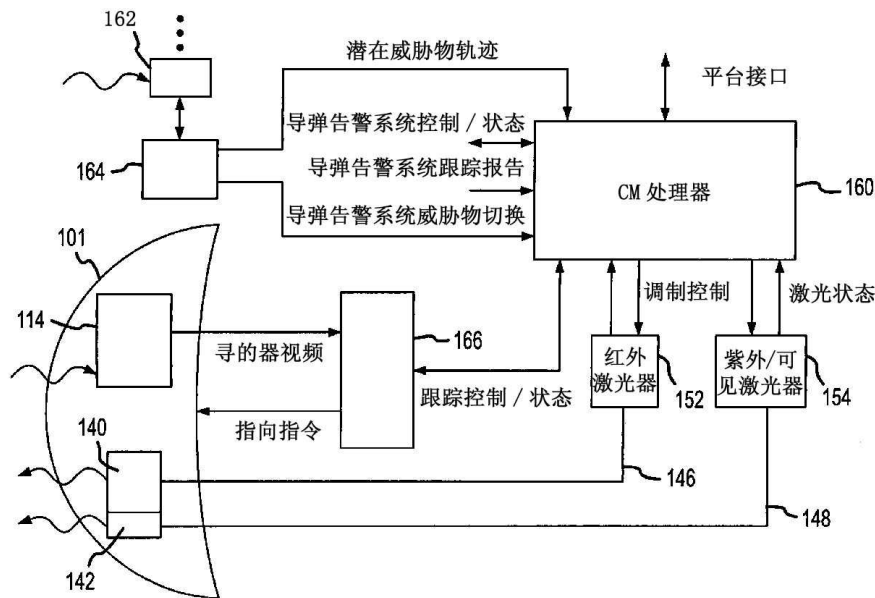
(2008 年 5 月 27 日授权)

恐怖分子所掌握的肩上发射的导弹对军用飞机特别是商用飞机构成了实际威胁。为了对付这些肩上发射的导弹，人们研制出了定向红外对抗系统，但这种定向红外对抗系统有的虚警率高，成功率低，难以有效地应付肩上发射的导弹的威胁。

本发明提供一种灵活、可靠的高功率定向红外对抗

系统，它可以容易地被扩展用来应付复杂的紫外或紫外-可见光多波段威胁。该系统所用的导弹告警器中有适合在中红外波长范围工作的多个单色或双色导弹告警接收器，它们能够探测导弹的发射，并将威胁物的坐标传递给上面装有红外激光发射器的、带滚转/万向支架的指向跟踪器。指向跟踪器根据威胁物的坐标信息旋转万向架开始跟踪，然后利用其探测器连续跟踪和验证威胁物。如果威胁物得到证实，指向跟踪器便指示激光器发射光束并干扰导弹的红外寻的器。由于是根据未验证的威胁物坐标就开始跟踪，所以该定向红外对抗系统能够响应近距离和近乎瞬间的肩上发射式导弹的飞行。

本专利说明书共 14 页，其中有 7 张插图。



高 编译